УГАТУ

Лекция №1

ВВЕДЕНИЕ В КУРС

Дисциплина: Криптографическая защита информации
Преподаватель: Миронов Константин Валерьевич
Поток: БПС-3
Учебный год: 2020/21

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Содержание лекции

- **Структура курса**
- Общие сведения о криптографии
- Исторический обзор

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Структура Курса

9 лекций

- Дистанционное проведение:
  - Объявление в СДО
  - Лекция в Zoom по расписанию
  - Презентация на СДО
  - Возможно: видео лекции на youtube
- Содержание:
  - Теоретический материал
  - Устные опросы
  - Доклады по материалу СРС

Посещение занятий не является обязательным и само по себе на зачет не влияет

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Структура Курса

9 лекций

Пожелания к докладам:

- Презентация 7-10 слайдов
- Выступление 7-10 минут
- Для каждого алгоритма рассмотреть:
  - общие характеристики и особенности,
  - краткую предысторию разработки,
  - процесс зашифровки и расшифровки (вычисления хеш-функций, постановки и проверки электронной подписи),
  - история криптоанализа и найденные уязвимости,
  - сведения о реальном применении.
- Файл презентации должен быть выложен на форуме СДО

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Структура Курса

3 лабораторные работы

- Каждая подгруппа разбивается на 4 бригады
  - Список бригад фиксированный, сдается преподавателю для настройки бригад на СДО
- Лабораторные работы №1 и 2
  - Выполняются самостоятельно, побригадно
  - Шифруемый текст должен содержать фамилии студентов
  - Отчет от имени бригады грузит на СДО любой студент бригады
- Лабораторная работа №3
  - Выполняется в чатах СДО в реальном времени

3 практики

- Список задач публикуется на СДО заранее
- По расписанию в Zoom студент описывает решение задач

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Структура Курса

зачет

- Лабораторные работы должны быть сданы
- По итогам активности на лекциях и практиках возможен автомат
  - Ответы при устных опросах по теоретическому материалу – необходимое условие, чтобы можно было делать доклады на лекциях и решать задачи на практиках
- 1-я часть зачета: 1 устный теоретический вопрос на знание базовых понятий
- 2-я часть зачета: 2 задачи письменно (допустимо пользоваться лекциями)
  - 1 задача: расчеты и здравый смысл
  - 1 задача: построение блоксхемы/псевдокода по словесному описанию
  - Задачи аналогичны решаемым на практиках
- Обе части надо сдать в один день, иначе 1-я не засчитывается

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Структура Курса

Основные темы

- Симметричное шифрование – базовые операции, режимы шифрования, блочные и поточные алгоритмы, генераторы (псевдо)случайных последовательностей
- Хэш-функции, коды аутентификации сообщений, функции формирования ключа
- Парольная защита – хеширование паролей, радужные таблицы, криптографическая соль
- Асимметричная криптография – шифрование с открытым ключом, электронная подпись распределение ключей, инфраструктуры открытых ключей
- Модные и перспективные направления - системы распределенного реестра, квантовые и постквантовые алгоритмы, гомоморфное шифрование и т.п.

Криптография эллиптических кривых и стеганография изучаются в рамках курсов «Программно-аппаратная защита информации» и «Теория информационной безопасности»

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Структура Курса

Рассматриваемые алгоритмы

- Блочные симметричные шифры – **3DES, AES, RC2, RC5, RC6, Blowfish, Twofish, Threefish, *Магма, Кузнечик***
- Режимы шифрования – **ECB, CBC, PCBC, CFB, OFB, CTR, XTS, RandomDelta, OCB**
- Поточные шифры – **A3, RC4, Salsa20**
- Хэш-функции – на базе функции сжатия (**SHA-2**, **MD6, Blake, *ГОСТ Р 34.11-94, Стрибог***), на базе криптографической губки (**SHA-3, Luffa**), имитовставки (**CBC-MAC, HMAC**, **UMAC**), функции формирования ключа (**PBKDF2, scrypt**, **Argon2**)
- Асимметричные универсальные – **RSA**, **алгоритм Эль-Гамаля, алгоритм Рабина, *ECC***
- Электронная подпись – **DSA/DSS, алгоритм Лэмпорта, алгоритм Винтерница, *ГОСТ Р 34.10-2012***

Алгоритмы, рассматриваемые на лекциях

Алгоритмы, изучаемые в рамках СРС и представляемые студентами в докладах

Алгоритмы, изучаемые в рамках курса «Программно-аппаратная защита информации»

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Содержание лекции

- Структура курса
- **Общие сведения о криптографии**
  - **Основные понятия**
  - **Симметричная и асимметричная криптография**
  - **Хэш-функции**
  - **Стеганография**
  - **Криптоанализ и правило Керкгоффса**
- Исторический обзор

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

- Криптографическая ЗИ – ЗИ путем ее модификации
- **Криптография** - инженерно-техническая дисциплина; занимается математическими методами защиты информации
- **Криптология** - отрасль дискретной математики; рассматривает математические модели криптографических схем.
- **Криптосинтез** – построение криптографических алгоритмов
- **Криптоанализ** – исследование методов взлома алгоритма

Альтернативный вариант – вместо криптографии термин криптология, вместо криптосинтеза – термин криптография

Определения в курсе не везде математически строги и не всегда точно соответствуют имеющимся в литературе/интернете. Во-первых, математически строгие определения, например, в теории сложности могут быть многостраничны, в то время как высказывание «*сложно рассчитать x*» - интуитивно понятно. Во-вторых, с методической точки зрения удобно увязывать понятия в систему и вводить их последовательно в соответствии со структурой курса. При проведении контроля от студента требуется прежде всего понимание сути тех или иных понятий и **умение оную суть внятно изложить**.

УГАТУ
Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

Задачи КЗИ

Обеспечение конфиденциальности:

- Сокрытие содержания информации (ЗИ от НСД) - **шифрование**
- Скрытная передача информации (тайнопись) – **стеганография**

Обеспечение целостности:

- Защита от намеренной подмены (аутентификация сообщений) – **имитовставки, электронные подписи**
- Удостоверение авторства – **электронные подписи**
- Аутентификация пользователей – **серверы ключей, инфраструктуры открытых ключей**
- Удостоверение времени подписания документа, защита от подмены данных самим автором – **системы распределенного реестра**

Вспомогательные задачи:

- Вычисление псевдослучайного кода малой длины (дайджеста) – **хеш-функции**
- Вычисление псевдослучайного кода большой длины – **генераторы ПСП**

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

«Большинство элементов системы безопасности напоминают стены и заборы тем, что не пропускают внутрь никого. Криптография же выполняет роль замка: она должна отличать хороший доступ от плохого»

«Система безопасности надежна настолько, насколько надежно ее самое слабое звено»

«Назначение криптографических протоколов состоит в минимизации объема доверия между участниками, необходимого для их взаимодействия»

Нильс Фергюссон, Брюс Шнайер «Практическая криптография»

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

Защищаемая информация может представлять собой:

- Текст из символов естественного языка – **классическая криптография**
- Аналоговый сигнал – **скремблирование**
- Последовательность данных в двоичном коде – **современная криптография**

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

В криптографии часто применяются **односторонние (необратимые) функции** и **функции с секретом**.

Функция $y = f(x)$ является односторонней, если не существует полиномиального способа вычислить x на основе известного y.

Коллизия односторонней функции – ситуация, когда два разных x дают в результате один и тот же y.

Функция $y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ является односторонней для x_i, если не существует полиномиального способа вычислить x_i на основе известных y и всех остальных x.

Функция $y = f(k_1, x)$, где k_1 вычислено с помощью некоторой односторонней функции $k_1 = f_0(k_2)$, является функцией с секретом (функцией с ловушкой), если нет полиномиального способа вычислить x на основе известных y и k_1, но существует полиномиальный способ вычислить x на основе известных y и k_2. **Секретом** в данном случае называется значение k_2.

Общие сведения

Криптографическая хеш-функция

- **Необратимая** функция y=f(x), где x – двоичный код произвольной длины, y – псевдослучайный двоичный код строго заданной длины (**дайджест сообщения**), такая, что...
- ...для любого заданного аргумента вычислительно невозможно подобрать другой, дающий то же значение (т.е. вычислительно невозможно получить коллизию хеш-функции)
- **Лавинный эффект**: при незначительном изменении x, y меняется радикально

```
SHA3-256("The quick brown fox jumps over the lazy dog")=
69070dda01975c8c120c3aada1b282394e7f032fa9cf32f4cb2259a0897dfc04
SHA3-256("The quick brown fox jumps over the lazy dog.")=
a80f839cd4f83f6c3dafc87feae470045e4eb0d366397d5c6ce34ba1739f734d
```

- Пример применения: проверка паролей, не требующая их хранения в памяти
  - **Функция формирования ключа** (Key derivation function, KDF) - хеш-функция, вычислительная сложность которой искусственно завышена, чтобы усложнить перебор паролей

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

Криптографический генератор псевдослучайных последовательностей

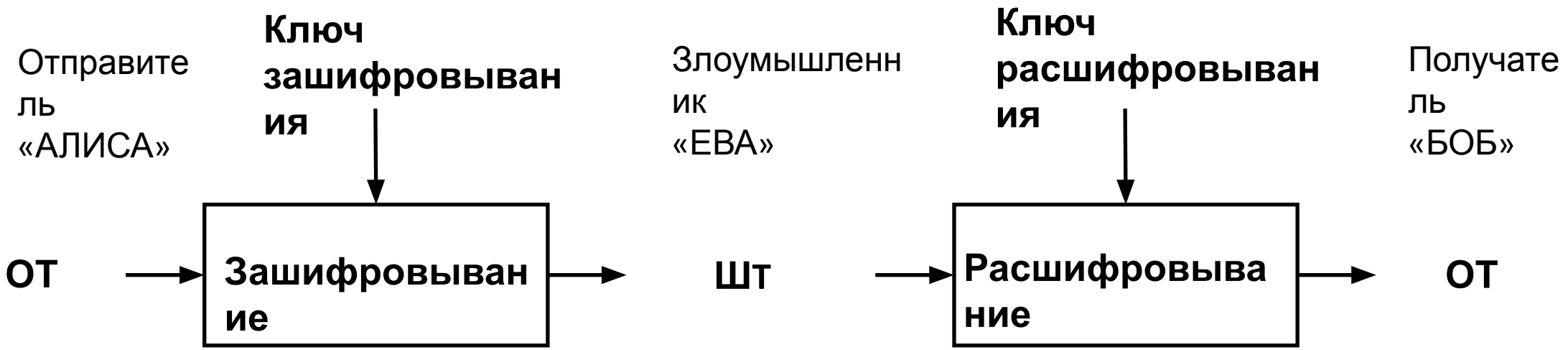
- **Необратимая** функция y=f(x), где x – двоичный код заданной длины, y – псевдослучайный двоичный код произвольной длины
- Пседослучайная последовательность (ПСП) должна быть **непредсказуема вправо и влево** – должно быть невозможно вычислить на основе отдельного фрагмента ПСП остальные ее части

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

Шифрование



Цель – сделать сообщение **нечитаемым** для посторонних

Симметричное шифрование – ключи зашифровывания и расшифровывания совпадают

Асимметричное шифрование – ключи различны

Здесь и далее:
ОТ – открытый текст
ШТ - шифротекст

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

Шифрование

Симметричное

- Данные как двоичный код
- В основе – простые операции
- Сложное описание алгоритмов
- Можно придумать бесконечное множество алгоритмов
- Требует мало ресурсов

Асимметричное

- Данные как целые числа
- В основе – сложный математический аппарат
- Простое описание алгоритмов
- В настоящее время известно лишь три базовых алгоритма с разными версиями
- Требует много ресурсов

Хеш-функции обычно «тяжелее» симметричных шифров в разы и «легче» асимметричных на порядки

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

Асимметричная криптосистема

- Два ключа – **открытый** (ОК) и **закрытый** (ЗК)
- Вычислены на основе общей секретной информации, либо ОК на основе ЗК
- Нельзя вычислить ЗК на основе ОК
- ОК публикуется, ЗК хранится в тайне
- Если зашифровано на ОК, расшифровать можно на ЗК
  - Зашифровать может любой, расшифровать - только владелец ЗК
  - Используется для ЗИ НСД - **асимметричное шифрование**

Общие сведения

Асимметричные криптосистемы и электронные подписи

- Если зашифровано на ЗК, расшифровать можно на ОК
  - Зашифровать может только владелец ЗК, расшифровать - любой
  - Используется для удостоверения авторства - **электронная подпись (ЭП)**
  - Есть и другие способы построения электронной подписи ->
- Функция постановки электронной подписи

$$\text{ЭП} = f_{sign}(\text{ОТ}, \text{ЗК})$$

- Функция проверки электронной подписи

$$\text{v} = f_{verify}(\text{ОТ}, \text{ОК}, \text{ЭП})$$ где v – логическая переменная; v = true ⇔ ОК соответствует ЗК

- Для экономии вычислительных ресурсов электронные подписи как правило ставятся не на сам подписываемый файл, а на его хеш-функцию

УГАТУ
Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

Имитовставка

Хэш-функция с ключом (имитовставка, код аутентификации сообщения, `Message Authentication Code, MAC`) – **необратимая** функция y=f(x,k), где x – двоичный код произвольной длины, k – секретный ключ, y – псевдослучайный двоичный код заданной длины

- Используется, чтобы удостовериться, что сообщение дошло Бобу в том виде, в котором было отправлено Алисой

Стеганография

- Цель – сделать сообщение **незаметным** для посторонних
- Сообщение интегрируется в контейнер – массив данных, в котором оно будет незаметно (напр. изображение, аудиофайл, поток видеоданных и т.д.)
- **Пример**. В черно-белом изображении формата .bmp каждый пиксель кодируется одним байтом. Изменение значений последнего бита каждого байта не влияет на внешний вид изображения. Следовательно защищаемую информацию можно записывать в последние биты каждого байта изображения

Стеганография рассматривается в рамках курсов «Программно-аппаратные средства ЗИ» и «Теория информационной безопасности»

УГАТУ
Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

Криптоанализ

- **Взлом шифра** – расшифровка шифротекста без знания ключа
  - Взлом хеш-функции или электронной подписи – нахождение коллизии
- **Атака на алгоритм** – попытка взлома
- Две стороны криптоанализа:
  - «Занятие злоумышленников»
  - Проверка на **криптостойкость** существующих алгоритмов
- Идеальный шифр можно взломать только полным перебором возможных значений ключа
  - Идеальную хеш-функцию/подпись – случайным перебором аргументов
  - Безопасная длина ключа - от 128(80) бит, безопасная длина хеш-функции – от 256(160)
- Когда говорят «алгоритм взломан» – часто подразумевается взлом «в теории»: найден способ нахождения ключа (коллизии), более быстрый, чем перебор
  - На практике алгоритм может оставаться криптостойким
  - Пример: «взлом» ГОСТ28147-89 в 2012 году - требуется 2^224 операций зашифровывания при наличии у злоумышленника 2^32 пар ОТ-ШТ

Общие сведения

Правило Керкгоффса

- В общем виде: «хороший криптографический алгоритм нельзя взломать, **зная, что был применен именно этот алгоритм, но не зная ключа**»
  - Для шифрования – нельзя **расшифровать шифротекст**, зная <…>
  - Для стеганографии – нельзя отличить пустой контейнер от контейнера, содержащего стеганограмму, зная <…>
- Практические следствия:
  - Популярность алгоритма сама себя усиливает
  - Применяются почти исключительно свободно распространяемые алгоритмы
- Противоположный подход: «Безопасность через неясность» [Security through obscurity]
  - Подход может создавать дополнительный уровень безопасности, но при этом секретный алгоритм должен быть безопасен сам по себе.

Общие сведения

Основные атаки на шифры

- Cipher-text-only – у Евы есть только шифротекст и знание, какой алгоритм применен
- Known-plaintext – у Евы есть набор пар открытый текст / шифротекст
  - Функция зашифровывания должна быть односторонней как относительно шифруемого текста так и относительно ключа
- Chosen plaintext / ciphertext – Ева может узнать, какой шифротекст / открытый текст соответствует заданному открытому тексту / шифротексту
- Meet in the middle – у Евы есть множество предполагаемых ключей и множество зашифрованных сообщений; при прослушивании канала связи она ожидает, когда появится сообщение, которое есть в множестве; по нему можно определить ключ
- Man in the middle – Ева подключена к каналу связи таким образом, что может управлять трафиком между Алисой и Бобом
- Related key – у Евы есть множество шифротекстов, зашифрованных разными ключами и знание, что эти ключи связаны между собой

УГАТУ
Уфимский государственный авиационный технический университет

Общие сведения

Основные атаки на хеш-функции

- Collision search – поиск другого аргумента, дающего то же значение, что и заданный
- Birthday attack – поиск пары аргументов, дающих одно и то же значение
  - Хеш-функция, устойчивая к атаке дней рождения называется **сильной**

Виды атак с технической точки зрения

- Атаки на любую криптосистему могут быть **оперативными** (злоумышленник взаимодействует с криптосистемой) и **автономными** (злоумышленник работает на своем компьютере без связи с системой)
- Особая разновидность - **атаки с использованием побочных каналов**
  - Злоумышленник анализирует косвенную информацию о работе криптосистемы – побочное излучение, энергопотребление, время выполнения команд (**тайминг-атаки**) и т.п.
  - Актуальны для специализированного аппаратного обеспечения (смарт-карт)

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Содержание лекции

- Структура курса
- Общие сведения о криптографии
- **Исторический обзор**
  - **Классическая криптография**
  - **Скремблирование**
  - **Современная криптография**
  - **Персоналии**
  - **Художественная литература**

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Исторический обзор

Классическая криптография

Перестановочные шифры

- V в. до н. э. «Сцитала Лисандра»
- Ключ – порядок перестановки

Подстановочные шифры

- I в. до н. э. «Шифр Цезаря»
- Ключ – таблица замен
- Способ взлома – частотный анализ символов

В XIX веке начали развиваться шифровальные машины, которые могли использовать комбинации подстановок и/или перестановок

С середины XX века классическая криптография утратила свое значение

1999 – шифр Solitair (Pontifex)

УГАТУ
Уфимский государственный авиационный технический университет

Скремблирование

Пример: защита телефонных разговоров от прослушивания

- Для речевого сигнала значимый диапазон 500-3000 Гц
- За пределами звук есть, но на разборчивость не влияет
- Фонемы – отдельные произносимые звуки
  - Гласные – поток воздуха через голосовые связки, ~100 мс
  - Взрывные – полное перекрытие потока губами, ~5 мс (п, к, т и т.д.)
  - Фрикативные – частичное перекрытие, 20-50 мс (ф, с, ш и т. д.)
- В русском языке ~40 фонем
- Скремблирование защищает от злоумышленников, не обладающих специальными техническими средствами
- 2 типа преобразований сигнала:
  - Частотные преобразования - модифицируется спектр сигнала
  - Временные преобразования - обработка сигнала на временных отрезках (кадрах)

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

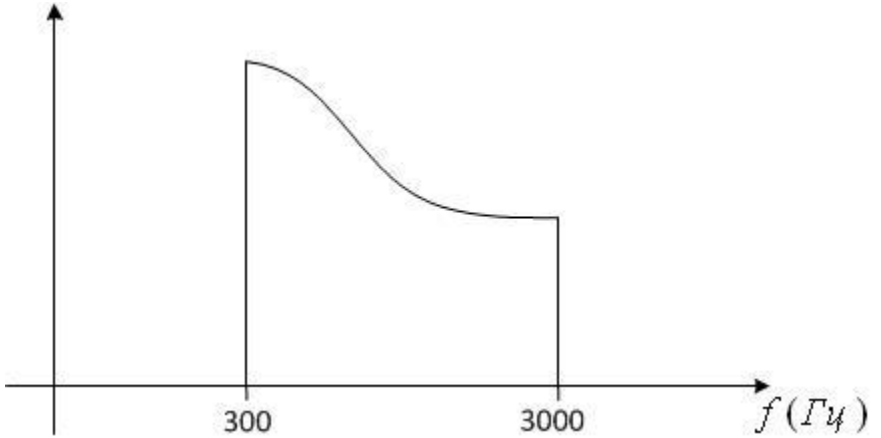
Скремблирование

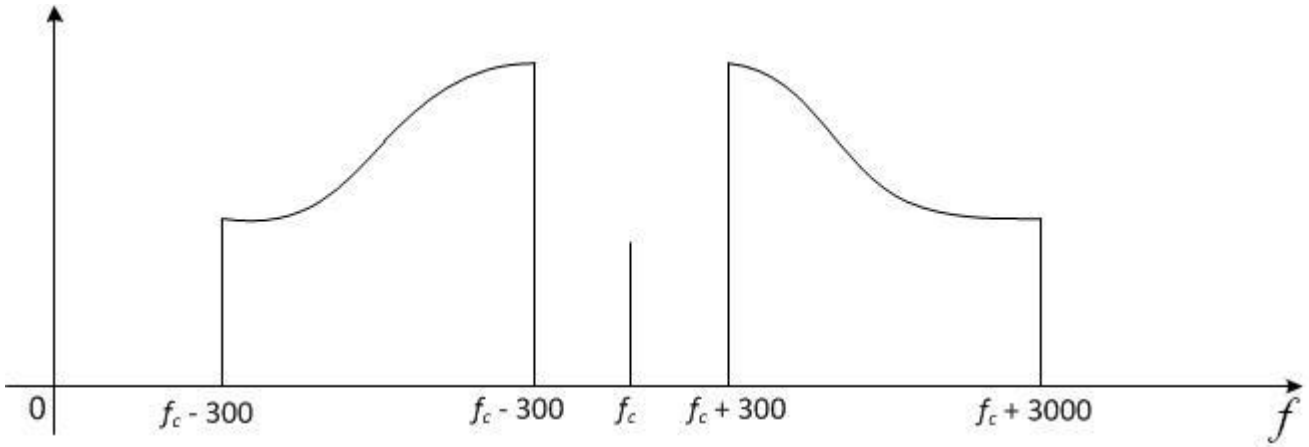
Инверсия спектра

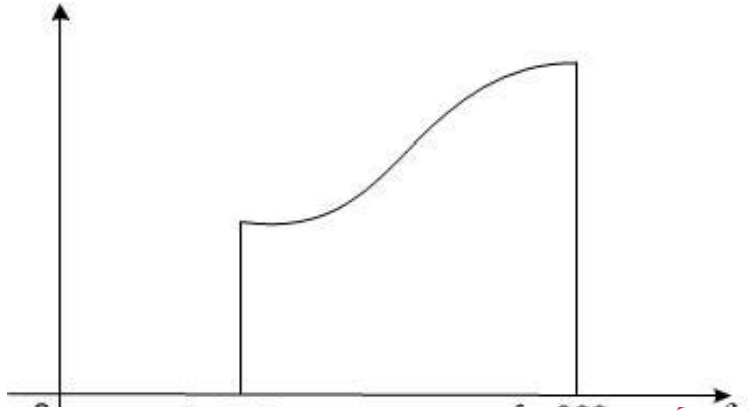
Спектр сигнала отзеркаливается

Смеситель – отражает сигнал относительно некоторой несущей частоты

На смесителях с разными несущими строятся аналоговые многоканальные линии







УГАТУ

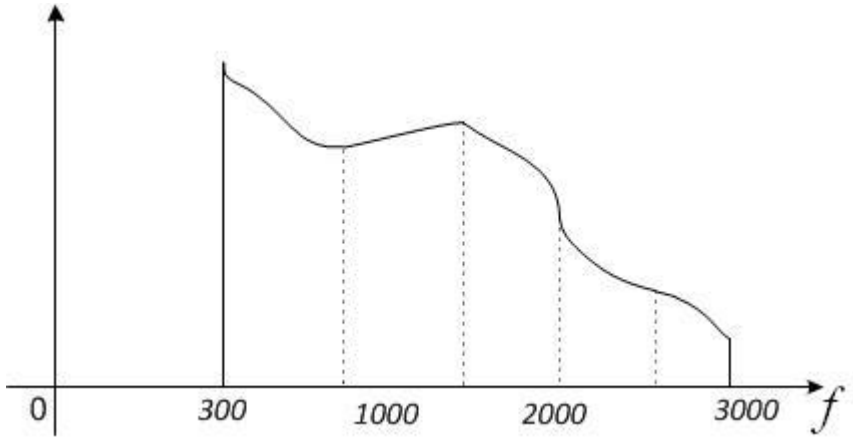
Уфимский государственный авиационный технический университет

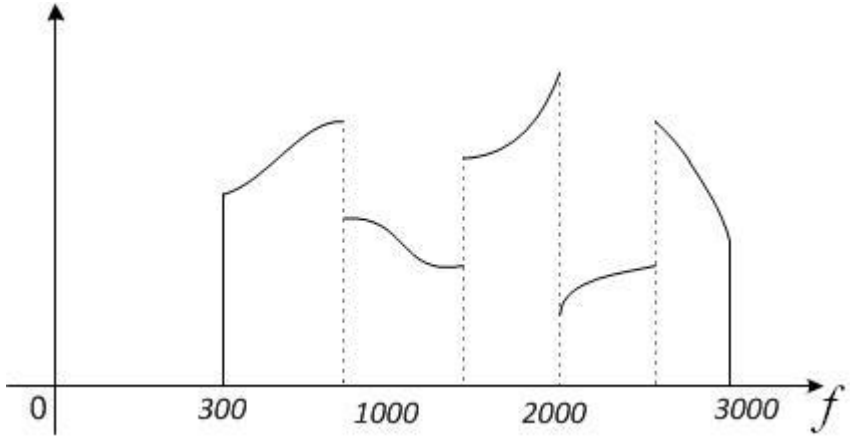
Скремблирование

Перестановка частот

Диапазоны на спектре меняются местами

Часть диапазонов может инвертироваться





УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Скремблирование

Временные преобразования

- Кадр делится на сегменты
- Обычно кадр из 8-16 сегментов по 20-60 мс
- Меньшая длина сегмента – хуже качество
- Большая длина кадра – большая задержки
- Преобразования, аналогичные частотным:
  - инверсия кадра
  - перестановка сегментов

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Современная криптография

Симметричное шифрование

- 1917 - Шифр Вернама
- 1920е-30е - Гаммирование
- 1945 – Клод Шеннон «Теория связи в секретных системах»
- 1972-77 – Сеть Фейстеля, разработка алгоритма DES (56-битный ключ)
- 1990-е – Возросшая мощность компьютеров позволила взламывать DES полным перебором ключей
- 1997-2000 Конкурс AES
  - Цель – выбор алгоритма на замену DES в качестве стандартного
  - Длина ключа – 128, 192, 256 бит
  - Простота программной реализации, работа на 32-разрядных процессорах (DES заточен под аппаратную реализацию)
  - Победитель (RIJNDAEL) стал стандартом AES
  - Ряд не прошедших конкурс алгоритмов нашли свое применение (RC6, Twofish)

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Современная криптография

Асимметричная криптография

- 1970-е – Теоретические работы Диффи, Хеллмана, Меркла («задача об укладке рюкзака»)
- 1977 – Алгоритм RSA
- 1991 – DSA
- 1998 – DSS (DSA + SHA-1)
- 1999 - ECDSA

Хеш-функции

- 1990 MD4
- 1995 SHA-1
- 2002 SHA-2
- 2007-2012 Конкурс SHA-3. Победитель – алгоритм Keccak
- 2013-2017 Взломы SHA-1. Отказ от использования алгоритма

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Современная криптография

Криптография в СССР и России

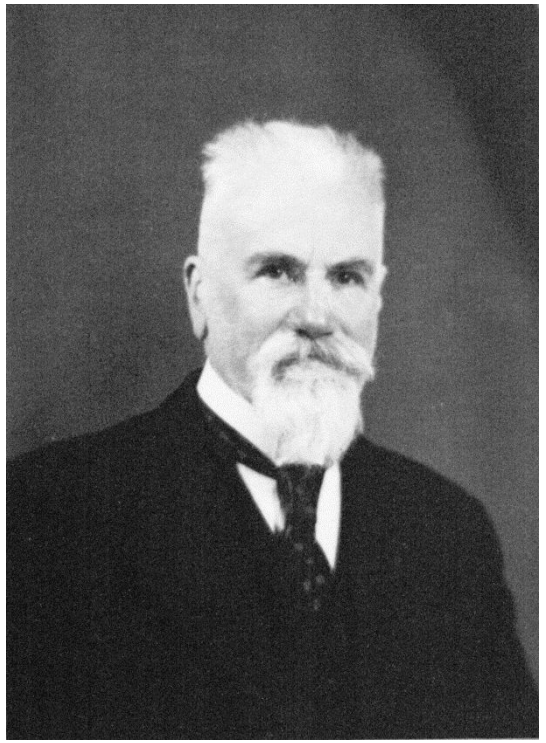
- 1937 – К-37 «Кристалл» (классическое шифрование) и М-100 «Спектр» (гаммирование)
- 1989 – ГОСТ 28147-89 – симметричный алгоритм (возможно, разработан в 70-е)
- 1994 – ГОСТ Р 34.11-94 – хэш-функция
- 1994 - ГОСТ Р 34.10-94 – ЭЦП на дискретных логарифмах (для хэширования применяется ГОСТ Р 34.11-94)
- 2001 - ГОСТ Р 34.10-2001 – новый стандарт ЭЦП (по сути – версия ГОСТ Р 34.10-94 на эллиптических кривых)
- Новые стандарты разработаны ФСБ совместно с ОАО «ИнфоТекс
  - 2012 - ГОСТ Р 34.11-2012 – новая хэш-функция «Стрибог»
  - 2012 - ГОСТ Р 34.10-2012 – стандарт ЭЦП (по сути ГОСТ Р 34.10-2001, но для хеширования применяется Стрибог)
  - 2015 (2018) – ГОСТ Р 34.12-2015 (-2018) – симметричные алгоритмы «Магма» (из старого ГОСТа) и «Кузнечик»

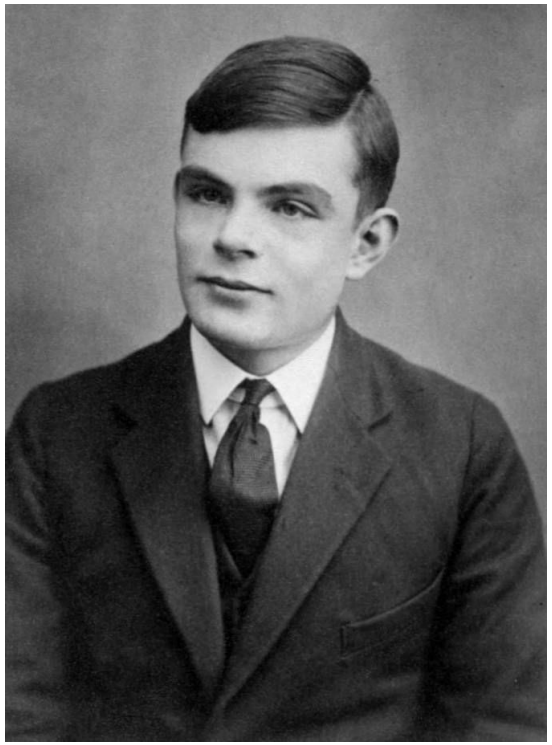
УГАТУ

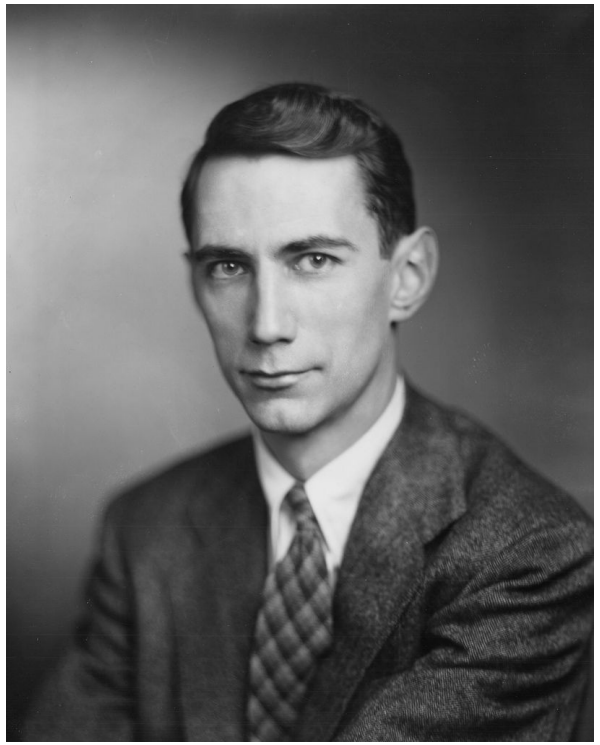
Уфимский государственный авиационный технический университет

Персоналии

Огюст Керкгоффс (1835-1903), Алан Тьюринг (1912-1954), Клод Шеннон (1916-2001)







Персоналии

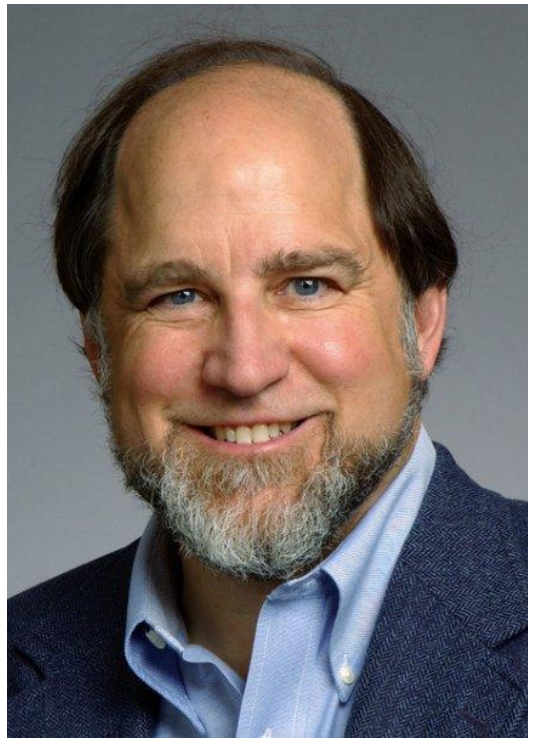
Хорст Фейстель (1915-1990)

- Первый крупный неправительственный автор шифров
- По сути создатель современного подхода к построению симметричных шифров
- Автор шифра Lucifer, позднее переделанного в DES

Персоналии

Рональд Райвест (род. 1947)

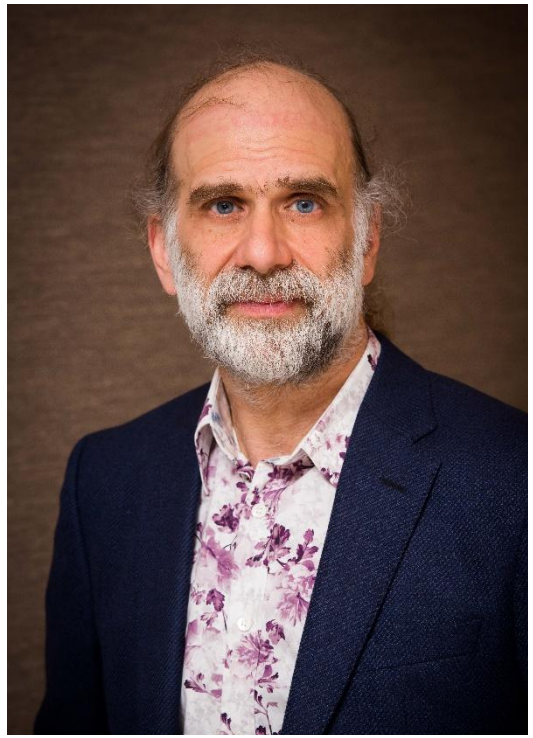
- Асимметричный алгоритм RSA (1977, совместно с А. Шамиром и Л. Эйдельманом)
- Блочные симметричные шифры: RC2 (1987), RC5 (1994), RC6 (1998)
- Поточный шифр RC4 (1987)
- Хеш-функции: MD2 (1989), MD4 (1990), MD5 (1991), MD6 (2008)



УГАТУ
Уфимский государственный авиационный технический университет

Персоналии

Брюс Шнайер (род. 1963)



- Блочные симметричные шифры: Blowfish (1993), Twofish (1998), Threefish (2008)
- Хеш-функция Skein (2008)
- Генератор псевдослучайных чисел с добавлением истинной случайности Fortuna (2003)
- Классический шифр Solitaire (1999)
- Блог https://www.schneier.com/
- Книги:
  - Прикладная криптография (1994)
  - Практическая криптография (2003, совместно с Н. Фергюссоном)

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Художественная литература

- 1843 Эдгар По «Золотой Жук»
- 1864 Жюль Верн «Путешествие к центру Земли»
- 1905 Артур Конан Дойль «Пляшущие человечки»
- 1999 Нил Стивенсон «Криптономикон»
- 2010 Ханну Райанниэми «Квантовый вор»